УДК 621.373.826

МЕХАНИЗМЫ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСЕЙ ГАЛОГЕНВОДОРОДОВ НА ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРА НА ПАРАХ МЕДИ

О.В. Жданеев*, Г.С. Евтушенко**

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, **Томский политехнический университет
Тел.: (382-2)-419-869

Проведена систематизация и обобщение имеющихся на данных момент сведений о механизмах влияния примесей галогенводородов (HBr, HCl) на кинетику активной среды лазера на парах меди (ЛПМ). Проводится анализ имеющихся отличий влияния молекул HCl и HBr на генерационные характеристики лазера на парах меди. Сделан вывод о том, что кинетика лазеров на парах меди с добавками электроотрицательных газов изучена недостаточно и существует необходимость проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований данного типа лазеров.

Введение

В настоящее время внимание исследователей и разработчиков лазеров на парах металлов (ЛПМ) уделяется не столько традиционному лазеру на парах меди, сколько его различным модификациям, содержащим в активной среде, наряду с буферным газом неоном, различные галогеносодержащие молекулы (HBr, HCl) [1–3]. Это лазеры на парах бромида и хлорида меди с примесью водорода и галогенводорода, лазеры на парах меди с добавками HBr и HCl. Данные добавки модифицируют кинетику разряда благоприятным для повышения генерационных характеристик образом. Введение добавок галогенводородов позволило получить увеличение средней мощности излучения в несколько раз при одновременном повышении эффективности генерации и оптимальной частоты следования импульсов возбуждения [4–8]. Значительно повышается и качество выходного излучения (особенно важный параметр в системах генератор-усилитель), которое является неоспоримым преимуществом газовых лазеров [9]. Наличие в разряде электроотрицательных примесей существенно влияет на кинетику плазмы активной среды лазера, как в течение импульса возбуждения, так и в послесвечении [5–22].

Важнейшими преимуществами лазеров, имеющих в активной среде примесь галогенводородов, являются следующие:

- Выходные характеристики этих лазеров не уступают, а в отдельных случаях превосходят, ЛПМ. В частности, лучшие генерационные характеристики для импульсно-периодических лазеров видимого диапазона спектра получены для лазера на бромиде меди и его аналога – гибридного лазера (CuHyBrID-laser). Так, эффективность лазеров превысила 3 %, при высокой средней мощности (более 100 Вт) и удельной (с единицы объема) мощности (до 2 Вт/см^3) – Н. Саботинов (Болгария) и К. Литтл (Великобритания), с соавторами – 1997–2000 гг. [23]. Для лазера на парах бромида меди достигнута самая высокая частота повторения импульсов генерации – 300 кГц [24].
- Как показали исследования характеристик разряда и кинетики, выполненные группой проф. Г. Петраша (ФИАН, совместно с группой К. Литтла), проф. Д. Пайпера (с соавторами – Макуори Университет, Австралия), наличие в активной среде электроотрицательных ионов молекул HBr (HCl) приводит к изменению кинетики активной среды в сторону, благоприятную для накачки рабочих состояний.

На данный момент отсутствуют работы, посвященные систематизации и обобщению имеющихся механизмов влияния примесей галогенводородов (HBr, HCl) на кинетику активной среды лазера на парах меди. Этим вопросам и посвящена статья.

Механизмы влияния примеси хлорводорода на генерационные характеристики ЛПМ

В этом разделе приводится перечень известных авторам механизмов влияния добавок хлорводорода на совокупность процессов, протекающих как в разрядном контуре, так и в активной среде лазера в течение импульса возбуждения и в период послесвечения.

1. Главное изменение в кинетике при введении примеси HCl заключается в увеличении скорости спада концентрации электронов в течение межимпульсного периода вследствие протекания реакций диссоциативного присоединения к колебательно возбужденным молекулам хлорводорода, что ведет к уменьшению предымпульсной концентрации электронов, создавая более благоприятные условия работы устройства [9–16].
2. По сравнению со стандартным ЛПМ уменьшается плазменный скин-эффект, определяющий развитие радиального электрического поля, что улучшает качество выходного пучка в 5…10 раз. К этому же эффекту приводит сдвиг "центра тяжести" импульса генерации к концу импульса одновременно с уменьшением его "колебательной структуры" [9–13, 15, 16].
3. При добавлении в активную среду HCl увеличивается сопротивление плазмы в течение импульса возбуждения вследствие изменения предымпульсной концентрации электронов. Это приводит к снижению максимального значения тока через газоразрядную трубку (ГРТ) при его ярко выраженном колебательном поведении [10–13, 16].
4. Введение примеси хлорводорода сопровождается увеличением концентрации атомов меди в активной среде, однако это не обеспечивает наблюдаемого увеличения средней мощности генерации [11–13].
5. Из результатов моделирования [12, 13] следует, что

наблюдается увеличение максимальной температуры электронов, причем длительность интервала, в течение которого энергия электронов остается выше уровня 3 эВ (именно в этот период осуществляется интенсивная накачка резонансных уровней), увеличивается, что ведет к увеличению длительности импульса генерации.

6. Замедляется спад температуры в начальной стадии послесвечения, что происходит вследствие падения количества кулоновских столкновений (типа е + A^+), из-за быстрой нейтрализации положительно заряженных ионов меди отрицательными ионами хлора [13].
7. Уменьшается истощение концентрации атомов меди в активной среде при одновременном значительном увеличении скорости восстановления населенности основного состояния в межимпульсный период [13].
8. Замедляется тушение метастабильных уровней атома меди в течение начального этапа межимпульсного периода вследствие снижения концентрации электронов, что приводит к снижению эффективности процесса электронного девозбуждения [13, 14].
9. Потери энергии электронов, в столкновениях с хлорсодержащими элементами, незначительны по сравнению с потерями в столкновениях с компонентами меди, водорода и неона, т.е. столкновения электронов с HCl, Cl, Cl^-, CuCl не оказывают заметного влияния на температуру электронов [13].
10. В течение импульса возбуждения влияние примеси HCl на кинетику активной среды вследствие низкой концентрации мало [13, 14].

Основные процессы, приводящие к изменениям в кинетике разряда (и генерации лазера) при введении примеси хлорводорода, представлены в табл. 1.

Механизмы влияния примеси бромводрода на генерационные характеристики ЛПМ

В данном пункте мы приводим список возможных механизмов влияния добавок бромводорода на процессы в электрической схеме возбуждения и в плазме газоразрядной трубки в течение импульса возбуждения и в межимпульсный период.

1. Главный механизм улучшения состоит в том, что вследствие диссоциативного присоединения к молекулам HBr в течение межимпульсного периода и в начале импульса возбуждения происходит эффективное удаление электронов из активной среды [12, 19] и увеличение задержки между импульсами тока и напряжения на ГРТ [12, 17, 18, 21, 22]. Вместе с тем, в работе [20] сообщается, что в присутствии примеси HBr увеличивается максимальная концентрация электронов.
2. Для эффективной работы примеси HBr, вследствие низкой скорости реассоциации необходима высокая скорость прокачки [12, 21].
3. Добавление HBr ведет к увеличению максимального напряжения при одновременном снижении тока через ГРТ вследствие уменьшения проводимости плазмы [12, 17, 18, 21, 22].
4. Наблюдается более быстрое восстановление концентрации атомов меди в основном состоянии на оси ГРТ, в несколько раз большее, чем для лазера с буферными смесями Ne-H_2 и Ne [15, 18].
5. Относительно изменений населенностей уровней атома меди имеются противоречивые данные. В частности, в работе [18] отмечается, что существенных изменений населенностей метастабильных, резонансных и основного уровней атома меди не происходит, однако в работах [15, 18, 20] приводятся данные о том, что:

5.1. Функционирование лазера с добавками HBr происходит при более высоких плотностях меди, чем для стандартного ЛПМ [15].

5.2. Изменяется скорость распада и радиальное распределение концентрации атомов меди в метастабильном состоянии [17].

5.3. В работе [20] отмечается, что введение в активную среду HBr сопровождается снижением концентрации меди на оси ГРТ.

6. Существуют разные точки зрения относительно влияния добавок бромводорода на температуру газа:

6.1. В работе [17] отмечается, что изменения радиального профиля газовой температуры малы.

6.2. В тоже время в [15, 21] приводятся сведения об увеличении температуры стенки ГРТ и увеличении порога тепловой устойчивости.

6.3. В работе [20] сообщается, что происходит снижение температуры газа на оси ГРТ при добавлении HBr.

7. Введение примеси бромводорода увеличивает длительность, изменяет форму импульса, что приводит к улучшению качества лазерного пучка – “beam quality” [12, 17, 21].
8. В работе [17] высказывается предположение о том, что улучшение генерационных характеристик связано с образованием в активной среде лазера отрицательных ионов водорода.
9. Согласно гипотезе авторов [19], введение примеси HBr модифицирует функцию распределения электронов по энергии таким образом, что создаются более благоприятные условия для работы лазера.
10. В работе [21] высказывается мнение о том, что в отпаянном варианте Cu-HBr лазера вследствие значительной степени диссоциации HBr улучшение генерационных характеристик не может быть объяснено механизмом диссоциативного присоединения.

Процессы, приводящие к изменениям в кинетике разряда и генерации Cu-лазера при введении примеси бромводорода, представлены в табл. 2.

Основные отличия в кинетике активных сред, содержащих HBr и HCl

В данном разделе суммированы имеющиеся в литературе сведения о различиях в кинетике активных сред,

генерирующих на переходах атома меди и содержащих в качестве активных примесей (к основному буферному газу неону) молекулы хлорводорода и бромводорода. Резюмируя, можно заключить, что:

1. Степень влияния указанных выше добавок на межимпульсную релаксацию температуры и концентрации электронов в течение импульса возбуждения различна. Предымпульсная проводимость плазмы Cu-HCl-Ne-лазера значительно выше, чем у Cu-HBr-Ne-лазера [11, 25].
2. Оптимальная концентрация добавок HBr в плазму лазера на парах меди с буферным газом неоном существенно выше по сравнению с добавками HCl. Для эффективной работы примеси HBr, в отличие от HCl, необходима более высокая скорость прокачки. Это связано с тем, что процесс восстановления молекул HCl в объеме плазмы при рабочих температурах (свыше 1000 K), протекает более эффективно, чем молекул HBr [10–12, 21].
3. Мощность и эффективность лазера на парах бромида меди с добавками водорода к буферному газу неону приблизительно на треть выше аналогичных параметров для $CuCl$-H_2-Ne-лазера [10, 11].

Заключение

Анализ имеющихся литературных данных, относящихся к исследованию влияния добавок как HBr, так и HCl на генерационные характеристики лазера на парах меди показывает, что введение малых добавок этих примесей в активную среду приводит к
венному улучшению выходных параметров ла
излучения (мощность, КПД, качество излуч
отличие от лазеров на парах чистых метал
накачки ЛПМ с активными добавками, а также
на парах галогенидов металлов, требования к и
накачки оказываются менее жесткими. Это п
реализовать более эффективную генерацию с
частотой следования не только на основных пе
металлов, лежащих в зелено-красной и ближ
областях спектра, но и на более слабых – в г
ближней УФ-областях. Об этом свидетельству
ные К. Литтла [23], Н. Саботинова с соавторами [22] и наши последние эксперименты с $PbBr_2$-лазером [26]. Вместе с тем, анализ выдвинутых предположений и выводов различных авторов относительно мех
влияния галогенводородов на выходные па
лазера свидетельствует об отсутствии единого
Это требует проведения дополнительных комп
исследований лазера на парах меди (и других м
с активными добавками в разряд, включающих
терное моделирование и реальный эксперимен

Таблица 1. Основные процессы, приводящие к изменениям в кинетике, вызванные введением примеси HCl. T_e – температура и N_e – концентрация электронов, N_{Cu}, $N_{Cu(D)}$, $N_{Cu(P)}$ – концентрации атомов меди в основ-..м, н..хнем и верхнем рабочем состояниях. Значки ↓ и ↑ – показывают тенденцию к уменьшению и увеличению, соответственно.

Процесс	Изменения в кинетике
HCl (ϖ=0) + e → HCl (ϖ≠0) + e	↓ T.
Cl + 2·e → Cl⁻ + e	↓ N.
HCl (ϖ) + 2·e → Cl⁻ + H + e	↓ N.
Cu + HCl (ϖ) → CuCl + e	↓ N_{Cu}
Cu^+ + Cl⁻ → Cu (P) + Cl	↑ $N_{Cu(P)}$
Cu (Δ) + Cl⁻ → CuCl + e	↓ $N_{Cu(D)}$, ↓ $N_{Cu(P)}$
Cu (Δ) + H_2 (ϖ) → CuH + H	↓ $N_{Cu(D)}$, ↓ $N_{Cu(P)}$
Cu (Δ) + HCl (ϖ=0) → Cu + HCl (ϖ+3)	↓ $N_{Cu(D)}$

Таблица 2. Основные процессы, приводящие к изменениям в кинетике, вызванные введением примеси HBr

Процесс	Изменения в кинетике
HBr (ϖ=0) + e → HBr (ϖ≠0) + e	↓ T.
Br + 2·e → Br⁻ + e	↓ N.
HBr (ϖ) + 2·e → Br⁻ + H + e	↓ N.
Cu + HBr (ϖ) → CuBr + e	↓ N_{Cu}

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atomic and Molecular Pulsed Lasers: Abstract of 5th Int. Conf. – Tomsk, Russia, 2001. – P. 21–36.
2. Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Laser Conference: Digest of 14th Int. Symp. On. – Poland, 2002. – P. OR25–OR30.
3. Лазеры на парах металлов: Тезисы докл. симп. – Ростов-на-Дону, 2002. – 75 с.
4. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. – М.: Научная книга, 1998. – 544 с.

5. Jones D.R., Maitland A., Little C.E. A high efficiency 200 W average power copper HyBrID laser // IEEE Q.E. – 1994. – Vol. 30. – P. 2385–2390.
6. Withford M.J., Brown D.J.W., Carman R.J., Piper J.A. Enhanced performance of elemental copper-vapour lasers by use of H_2-HCl-Ne buffer gas mixtures // Optics Letters. – 1998. – Vol. 23. – № 9. – P. 706–708.
7. Jones D.R., Little C.E. Kinetics of copper HyBrID lasers // Proc. SPIE. – 1995. – Vol. 2619. – P. 52–67.
8. Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г. Роль отрицательных ионов в плазме импульсных лазеров на парах металлов и их соединений // Квантовая электроника. – 1997. – Т. 24. – № 7. – С. 596–600.
9. Brown D.J.W., Withford M.J. and Piper J.A. High-power, high-brightness master-oscillator power-amplifier copper laser system based on kinetically enhanced active elements // IEEE Q.E. – 2001. – Vol. 37. – P. 518–524.
10. Sabotinov N.V., Vuchkov N.K., Astadjov D.N. Effect of hydrogen in the CuBr- and CuCl-vapour lasers // Optics comm. – 1993. – Vol. 95. – P. 55–56.
11. Mildren R.P., Osgood K.E., Piper J.A. Characteristics of copper HyBrID-type lasers which use HCl reactive gas // Opt. and quantum electronics. – 1997. – Vol. 29. – P. 991–998.
12. Withford M.J., Brown D.J.W., Carman R.J., Piper J.A. Kinetically enhanced copper vapour lasers employing H_2-HCl-Ne buffer gas mixtures // Optics comm. – 1998. – Vol. 154. – P. 160–166.
13. Carman R.J., Mildren R.P., Withford M.J., Brown D.J.W. and Piper J.A. Modeling the plasma kinetics in a kinetically enhanced copper vapour laser utilizing HCl+H_2 admixtures // IEEE Q.E. – 2000. – Vol. 36. – P. 438–449.
14. Carman R.J., Mildren R.P., Piper J.A., Marshall G.D., Coutts D.W. Plasma kinetics issues for repetition rate scaling of kinetically enhanced copper vapour lasers // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4184. – P. 215–218.
15. Mildren R.P., Withford M.J., Brown D.J.W., Carman R.J. and Piper J.A. Afterglow ground-state copper density behavior in kinetically enhanced copper vapor lasers // IEEE Q.E. – 1998. – Vol. 34. – № 12. – P. 2275–2278.
16. Marshall G.D., Coutts D.W. Repetition rate scaling up to 100 kHz of a small-scale (50W) kinetically enhanced copper vapour laser // IEEE J. of sel. Topics in Quantum Electronics. – 2000. – Vol. 6. – № 4. – P. 623–628.
17. Astadjov D.N., Vuchkov N.K., Sabotinov N.V. Parametric study of the CuBr laser with hydrogen additives// IEEE Q.E. – 1988. – Vol. 24. – № 9. – P. 1927–1935.
18. Astadjov D.N., Isaev A.A., Petrash G.G., Ponomarev I.V., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Temporal and radial evolution of the populations of CuI in the CuBr vapor laser // IEEE Q.E. – 1992. – Vol. 28. – № 10. – P. 1966–1969.
19. Isaev A.A., Jones D.R., Little C.E., Petrash G.G., Whyte C.G., Zemskov K.I. Characteristics of pulsed discharges in copper bromide and copper HyBrID lasers // IEEE Q.E. – 1997. – Vol. 33. – № 6. – P. 919–926.
20. Chang C., Sun W. Effect of additive hydrogen on kinetics mechanisms of CuBr lasers // Optics comm. – 1995. – Vol. 117. – P. 357–366.
21. Withford M.J., Brown D.J.W., Carman R.J., Piper J.A. Investigation of the effects of bromine and hydrogen bromide additives on copper vapour laser performance // Optics comm. – 1997. – Vol. 135. – P. 164–170.
22. Vuchkov N.K., Astadjov D.N., Sabotinov N.V. Influence of the excitation circuits on the CuBr laser performance // IEEE Q.E. – 1994. – Vol. 30. – № 3. – P. 750–758.
23. Little K. Metal Vapour Lasers. – John Willey & Sons, London, 1999. – 620 p.
24. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. CuBr-лазер частотой следования импульсов до 300 кГц // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 28. – № 3. – С. 220–222.
25. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. Лазер на парах бромида меди с высокой частотой следования импульсов // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 33. – № 8. – С. 680–682.
26. Evtushenko G.S., Andrienko O.S., Zhdaneev O.V., Pavlinsky A.V., Shestakov D.Yu., Shiyanov D.V., Sokovikov V.G., Sukhanov V.B. Lead bromide vapour laser // Proc. SPIE. – 2002. – V. 4747. – P. 202–206.